RESEARCH ARTICLE

건물에너지해석용 국내 표준기상자료들의 일사량 비교분석 연구

강은호[1] · 김동수[2] · 이효문[3] · 윤종호[2†]

[1]한밭대학교 건축공학과, 박사과정
[2]한밭대학교 건축공학과, 교수
[3]한밭대학교 건축공학과, 박사

A Comparative Analysis of Solar Radiation in Korea's Typical Meteorological Year for Building Energy Analysis

Kang Eun-Ho[1] · Kim Dong-Soo[2] · Lee Hyo-Mun[3] · Yoon Jong-Ho[2†]

[1]Ph.D. Student, Dept. of Architecture Engineering, Hanbat National University
[2]Professor, Dept. of Architecture Engineering, Hanbat National University
[3]Ph.D., Dept. of Architecture Engineering, Hanbat National University

[†]Corresponding author: jhyoon@hanbat.ac.kr

Abstract

This research paper examined the variation in solar irradiance quantitatively over time by comparing solar irradiance data from domestic Typical Meteorological Year (TMY) records. Solar radiation can produce different TMY records depending on the year of data collection, even for the same region. Therefore, simulation users should take these factors into consideration and select appropriate TMY records based on their specific needs. The results showed that the recently produced TMY records had higher solar irradiance values than those produced in the past. The average annual deviation between different TMY records was 86.1 kWh/m^{2}yr (6.5%). However, a comparison of TMY records from KIRE and SAREK, which have a significant difference in publication date, demonstrated that the deviation increased to an average of 204 kWh/m^{2}yr (14.4%), with a maximum of kWh/m^{2}yr (16.9%). The study also found that the difference in solar irradiance is related to the ratio of direct solar radiation when converting GHI to inclined plane irradiance. The annual cumulative solar irradiance showed significant variations on the southern inclined planes with a high ratio of direct solar radiation, while minimal changes were observed on northern inclined planes with a high ratio of diffusion solar radiation.

Keywords: 수평면 일사량(Global horizontal irradiance), 경사면 일사량(Irradiance of inclined plane), 표준기상년(Typical meteorological year), 직산분리(Decomposition), 경사면 일사량 변환(Transposition), 일사량 폴라그래프(Polar graph of irradiance)

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.6, pp.157-171, December 2022
https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.6.157

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 29 September 2022

Revised: 16 December 2022

Accepted: 19 December 2022

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 온실가스에 따른 환경 문제가 전세계적으로 대두되면서 건물 부문의 제로에너지

화 기술 및 신재생에너지 시스템의 수요가 증가하고 있으며 관련 정책이 활성화되고 있는 추세이다[1,2]. 일반적으로 건물 단위로 적용되는 신재생에너지 시스템은 실제 적용에 큰 비용을 수반하기 때문에 시행착오 예방, 적정 용량 산정 등을 목적으로 설계단계에서 시뮬레이션을 활용하여 사전검토를 진행한다. 사전 시뮬레이션 진행 시에 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서 대상 지역의 적절한 기상조건을 입력하는 과정은 매우 중요하다. 건물 에너지소비량 및 신재생에너지 시스템의 생산 에너지는 외부 기상조건 영향에 크게 좌우되기 때문이다[3].

시뮬레이션 입력데이터로 활용되는 기상데이터는 장기 관측된 기상데이터로 제작된 표준기상데이터를 사용하는 것이 일반적이다. 표준기상데이터(Typical Meteorological Year, TMY)는 10년 이상 측정된 기상데이터를 기반으로 대표 월간 기상데이터를 조합하여 제작된 기상데이터로써 대상 지역의 일반적인 기상 특성을 나타낼 수 있도록 제작된다. 따라서 TMY는 흑점 주기, 엘니뇨 등과 같은 장기주기를 갖는 기후 현상을 반영될 수 있도록 최소 10년의 이상의 장기 관측 데이터를 기반으로 제작하도록 권장하고 있다[4].

현재까지 국내에서 제작된 주요 TMY들을 살펴보면 1989년 대한설비공학회(The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, SAREK)에서 제공한 HASP와 이후 한국태양에너지학회(Korean Solar Energy Society, KSES)에서 제작한 TMY가 있다[5,6]. 최근(2000년 이후) 기상데이터를 중심으로 작성된 TMY로는 한국패시브건축협회(Passive House Institute Korea, PHIKO)에서 제작한 TRY와 한국에너지기술연구원(Korea Institute of Energy Research, KIER)에서 제작한 TMY가 있다[7,8]. 이처럼 여러 TMY가 존재하기 때문에 시뮬레이션 사용자는 국내 기상조건 입력을 위해 공개된 TMY들 중 선택적으로 활용할 수 있다. 하지만 각 TMY들은 제작연도 차이에 따라 사용된 장기측정 데이터 또한 상이하기 때문에 같은 지역에 대해 제작된 TMY라도 차이가 있을 수 있으며 이는 시뮬레이션 결과까지 영향을 미칠 수 있다[9-11].

특히 TMY 구성요소 중 일사량의 경우, 관측 연도에 따른 변화 경향이 다수 보고되었다. 선행연구에 따르면 국내 일사량이 1990년대를 기점으로 증가하는 경향이 보고되었으며[12,13], 중국, 유럽 등 세계 각지에서도 일사량이 1950년대부터 1980년대까지 감소(Dimming)하였으나 1990년대부터 2010년대까지의 관측에서는 증가(Brightening)하는 경향이 보고되었다[14-16]. 이러한 점을 고려하였을 때, TMY의 일사량은 제작연도에 따라 다른 특징을 보일 수 있다.

일사량은 건물의 냉난방 부하 및 신재생에너지 시스템에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이기 때문에 국내 TMY 일사량 비교분석 연구는 꾸준히 진행되어왔다. Yoo et al. (2009)[17]은 TRANSYS, EnergyPlus 등과 같은 시뮬레이션 프로그램에서 제공하는 TMY와 KSES의 TMY를 대상으로 일사량 비교분석을 수행하였다. 실측 데이터로 작성된 TMY에서는 TMY 간의 일사량 차이가 적게 나타났지만, 운량을 통해 생성된 일사량으로 비교할 경우 TMY2 형식으로 제작된 일사량이 다른 TMY 대비 상당히 적은 수치를 나타낸다고 보고하였다. Lee et al. (2017)[18]은 20년간(1991 - 2010)의 기상청 데이터를 이용하여 TMY를 제작하고 해당 TMY의 일사량 데이터를 KSES의 TMY 및 시뮬레이션 프로그램의 TMY 데이터들과 비교 분석하였다. 수평면 전일사량의 경우, 제작된 TMY와 모든 비교 대상 TMY와 유사한 경향을 보였으며 법선면 직달일사량은 KSES의 TMY를

제외하고 나머지 TMY와 일관성 있는 결과가 나타났다고 보고하였다. Kim et al. (2019)[19]은 국내 TMY들을 대상으로 주성분 분석을 진행하여 TMY 자료구조의 일관성을 비교 및 검토하였다. KSES와 KIER의 TMY의 경우, 대상 지역들에 대한 주요 기후 인자들이 동일하게 나타났지만 PHIKO의 TMY는 지역에 따라 데이터의 주요 기후 인자가 지역에 따라 다양하게 나타나 데이터의 일관성 측면에서 미흡한 점이 있다고 보고하였다.

선행연구들은 다양한 측면에서 TMY들의 특성을 비교 분석하였다. 그러나 현재까지 제작된 TMY들에 대하여 비교분석을 진행한 사례가 미흡한 실정이다. 기상관측 시기에 따라 일사량의 변화가 존재하면, TMY간의 일사량 차이는 제작연도에 따라 심화될 수 있으며 나아가서 시뮬레이션 결과 또한 다양하게 나타날 수 있기 때문에 시뮬레이션 사용자는 이러한 변수를 사전에 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 현재까지 배포된 국내 TMY의 일사량 데이터들을 비교 분석함으로써 국내 TMY 일사량의 상대적 편차에 대한 기초자료를 제시하는데 목적이 있다. TMY 제작 시에 수평면 전일사량이 직산분리 모델에 의한 변동성이 적은 점을 고려하여[20], 비교분석은 수평면 전일사량을 중심으로 진행된다.

2. 연구방법 및 범위

본 연구의 주요 목적은 건물에너지해석용으로 국내에서 사용되고 있는 TMY들의 일사량 차이를 상대적으로 비교하는 것으로 연구 과정은 Fig. 1과 같이 진행된다. 첫 번째 단계에서는 비교대상 TMY의 수평면 전일사량이 비교 분석된다. 가장 먼저 제작된 TMY를 기준으로 나머지 TMY들의 수평면 전일사량이 연간 및 월간 누적량에 대해 상대적으로 비교되며 TMY 제작 시점에 따른 일사량 변화 경향이 기상청에서 제공하는 수평면 전일사량과 비교된다. 두 번째 단계에서는 경사면 변환에 따른 TMY 일사량 비교분석이 진행된다. 경사면 일사량 변환은 각 TMY의 수평면 전일사량에 직산분리 모델을 적용하여 수행된다. 직산분리 모델의 경우, 직달 일사량 및 확산 일사량은 시뮬레이션 도구 및 사용되는 모델에 따라 다양할 수 있다는 점을 고려하여 각 표준기상자료의 수평면 전일사량에 동일한 직산분리 모델이 일괄적으로 적용되었다.

연도별 비교에서는 대상 TMY의 전체적인 비교를 위해 6개의 지역(서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 광주)을 대상으로 진행되며 월별 비교와 경사면 일사량 비교에서는 일사량이 최솟값, 중앙값, 최대값을 나타내는 서울, 대전, 부산 지역을 대표지역으로 선정하여 분석이 진행된다.

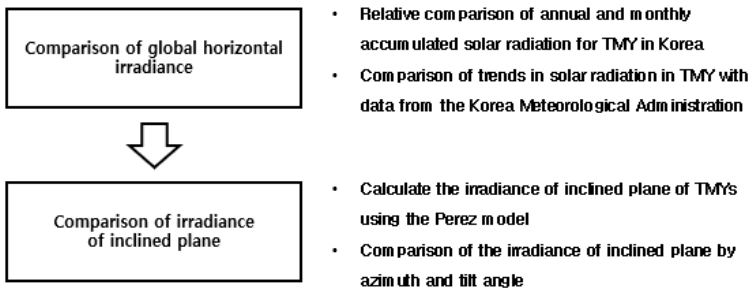

Fig. 1 Flowchart of research process

2.1 비교 대상 TMY 개요

비교 대상이 되는 TMY는 총 4가지로 제작 관련 정보들이 아래 Table 1에 나타나 있다. 각 TMY들을 구성하는 기상데이터의 관측기간은 1974년부터 2017년까지 다양하게 분포되어 있으며 TMY들은 3가지 다른 방법에 따라 제작되었다.

Table 1 Korea's TMY for comparative analysis[4,21-26]

		KIER	PHIKO	KSES	SAREK
Period of Database		2008-2017	2005-2014	1981-2010	1974-1983
Type		TMY3 (Sandia method)	TRY (ISO 15927-4)	TRY (ISO 15927-4)	HASP (SHASE of Japan)
Decomposition Model		Reindl et al.	Skartveit & Olseth	Lee et al.	Bouguer's and Berlage's equation
Irradiance Component*	GHI	●	●	●	●
	DNI	●	●	●	●
	DHI			●	●

* GHI: Global Horizontal Irradiance, DNI: Direct Normal Irradiance, DHI: Diffuse Horizontal Irradiance

KIER에서 제작된 TMY는 10년(2008 – 2017) 동안 관측된 데이터 기반으로 TMY3 형식으로 제작되었다[8]. TMY3은 미국 Sandia 연구소와 NCDC에서 개발된 형식으로 10가지 기상요소에 기반하여 TMY를 구성하는 대표월을 선정한다. TMY3에서 사용하는 대표월 선정 지표 WS는 FS (Finkelstein–Schafer) 통계량에 기반한 지표로써 여기에 각 기상요소별 가중치 w를 고려하여 식(1)에 따라 산출된다. FS통계량은 특정 연도 y 기상데이터의 누적분포함수 $F_{m,y}$와 장기 기상데이터의 누적분포함수 $F_{m,Y}$의 편차의 합으로써 장기 데이터와의 유사성을 나타낸다. WS가 계산되면 해당 값이 가장 낮은 5개 연도의 월이 후보월로 선택되며 후보월들에 대해 건구온도와 수평면 전일사량의 근접성과 지속성을 평가하는 과정을 거쳐 대표월이 선정된다. 모든 대표월이 선정되면 이를 연결하여 TMY가 결정되며 결합되는 대표월 사이의 불연속성을 완화하기 위해 월간 접속지점의 전후 6시간 데이터는 선형보간된다[4].

$$WS_{m,y} = \sum_{p=1}^{P} w_p FS_{m,y,p} \tag{1}$$

$$FS_{m,y,p} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mid F_{m,y}(\triangle p_i) - F_{m,Y}(\triangle p_i) \mid \tag{2}$$

여기서,

p: 기상요소

$F_{m,y}$: y기간 m월의 누적분포함수

Y : 장기 데이터의 전체 측정기간

PHIKO의 TRY와 KSES의 TRY는 ISO 15927-4에서 제시하는 형식으로 제작되었으며 사용된 장기 측정 데이터 기간은 각각 10년(2005 – 2014), 30년(1981 – 2010)이다[6,7]. ISO 15927-4의 TRY는 건구온도, 수평면 전일사량, 풍속 3가지 기상요소에 대한 FS 통계량(Finkelstein-Schafer Statistic)을 바탕으로 대표월을 선정하고 해당 월의 조합으로 TMY를 결정한다. 대표월은 식(3)에 따라 3가지 기상요소(건구온도, 수평면 전일사량, 풍속)의 월단위 FS 통계량 가중 합이 가장 적은 연도의 월로 결정된다. 모든 대표월이 선정되면 해당 월들이 결합되어 TMY가 결정되며 결합되는 대표월 사이의 불연속성을 완화하기 위해 대표 월 사이의 접속지점의 데이터는 전후 2시간의 평균값으로 대체된다[22].

$$FS_{m,y,w} = \sum_{p=1}^{P}\sum_{i=1}^{n} w_p \mid F_{m,y}(\triangle p_i) - F_{m,Y}(\triangle p_i) \mid \tag{3}$$

SAREK의 TMY는 10년(2005 – 2014)동안 관측된 데이터를 이용하여 HASP 형식으로 제작되었다. HASP은 일본 공조위생학회(The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers, SHASE)에서 개발된 TMY 형식으로 대표월 선정을 위해 장기측정 데이터의 월평균 값 $\overline{W}$과 특정 연도의 월평균 값 W_y을 이용한다. $\overline{W}$과 W_y의 편차가 1 표준편차 미만을 보이면 해당연도의 월은 후보월로 산출된다. 이후 후보월이 산출된 연도에 대하여 식(4)에 따라 수치지표 DM_y를 계산하고 수치지표의 절대값이 가장 적은 월이 대표월로 선정된다[25]. 여기서 k_{ghi}와 k_h는 각각 수평면 전일사량에 대한 가중계수와 절대습도에 대한 가중계수이다. 12개 대표월 선정이 완료되면 각 월의 연결 지점에서 전후 2일의 데이터 이내에서 데이터가 교차하거나 근접하는 시간에 접속됨으로써 TMY가 완성된다.

$$DM_{y,m} = (W_{dbt,y,m} - \overline{W}_{dbt,m}) + k_{ghi}(W_{ghi,y,m} - \overline{W}_{ghi,m}) + k_h(W_{h,y,m} - \overline{W}_{h,m}) \tag{4}$$

2.2 기상청 관측데이터

기상청에서 제공하는 데이터는 각 지역에 위치한 기상대에서 측정된 데이터로써 관측에 사용되는 장비는 기상청 관련 행정규칙에 따라 관련 표준규격(Table 2)을 만족하며 교정을 2년 주기로 받는다[27]. 아래 Table 3은 비교 대상 지역에 해당되는 6개 지역 기상대의 위치정보를 나타낸다[28]. 데이터처리 과정에서 전체 데이터 대비

1% 이상의 결측치 혹 이상치 데이터를 포함한 연도의 데이터는 분석에서 제외하였다. 모든 지점에서 공통적으로 관측이 이루어진 38년(1984 – 2021) 기간의 데이터를 분석대상으로 하였다.

Table 2 Standard specification for pyranometer[27)]

Specifications	Value
Sensitivity	7 ~ 17 μV /(W/m^2)
Non-linearity	±0.5 %
Non-stability	±0.8 % / year
Accuracy	2 % (daily), 3 % (houly)
Operating temperature range	-40 ~ +60°C
Output range	0-1,500 W/m^2
Resolution	1 W/m^2

Table 3 List of the observation stations[28)]

	Seoul	Incheon	Daejeon	Gwangju	Daegu	Busan
Latitude (N)	37°34′	37°29′	36°22′	35°10′	35°53′	35°06′
Longitude (E)	126°58′	126°37′	127°22′	126°53′	128°37′	129°02′
Height above sea level (m)	85.7	69.0	68.0	70.3	58.8	69.6

2.3 경사면 일사량 변환

경사면 변환에 따른 변화량을 검토하기 위해 각 TMY의 GHI을 경사면 누적 일사량으로 변환하여 대상 TMY의 일사량 비교가 진행된다. 경사면 일사량을 산출하기 위해 각 TMY의 GHI에 대하여 직산분리가 수행된다. 직산분리는 GHI을 직달 일사(Direct Irradiation) 성분과 산란 일사(Diffuse Irradiation) 성분으로 분리하는 과정을 나타낸다. 적용되는 기상변수 및 데이터처리 과정에 따라 다양한 직산분리 모델이 존재하기 때문에 동일한 데이터라도 적용되는 모델에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있다[29)].

제시된 국내 TMY들은 각기 다른 직산분리 모델을 통해 산출된 직달 일사 및 확산 일사를 제시하고 있다. 이러한 점은 적용되는 직산분리 모델 특성에 따라 산출 결과가 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 해당 영향을 최소화하기 위해 각 표준기상데이터에 Perez model[30)]을 적용하여 직달 일사 및 확산 일사를 재산출하였다. Perez model은 DISC 알고리즘[31)]을 바탕으로 제작된 직산분리 모델로써 대기 중의 습도 및 수증기압을 고려하여 청천공에서의 청명계수(clearness index for cloudless sky)와 및 대기질량(Airmass)을 산출하고 이에 기반하여 법선면 직달일사량과 수평면 확산 일사량을 산출한다. 이후 경사면 일사량을 산정하기 위해 등방성(Isotropic) 변환 모델을 이용하여 경사면 직달 일사량, 경사면 산란 일사량, 경사면 반사 일사량 3가지 성분을 계산한 후 경사면 전일사량을 산출하였다.

3. 국내 표준기상데이터에 따른 수평면 전일사량 비교 결과

3.1 수평면 전일사량 비교

본 절에서는 국내 TMY의 GHI를 연단위 및 월단위로 비교한다. Fig. 2는 6개 지역(서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 광주)의 연간 누적 수평면 전일사량을 나타낸 그래프이다. 전체 6개 지역에서 최근 제작된 TMY인 KIER의 TMY와 PHIKO의 TRY의 누적일사량이 큰 값을 나타내는 경향을 보이고 있으며 비교적 과거에 제작된 SAREK와 PHIKO의 TMY의 누적일사량이 대체로 낮은 수치를 보이고 있다.

특히, 가장 최근에 제작된 KIER의 GHI와 가장 제작시점이 오래된 SAREK의 GHI를 비교하였을 경우, 편차가 명확하게 나타난다. 연간 누적량에 대한 편차는 평균 204 kWh/m^2·yr으로 나타났으며 지역마다 다양하다. 적게는 124 kWh/m^2·yr (광주 지역)에서 최대 258 kWh/m^2·yr (서울 지역)까지 나타났다. 한편 제작 시점이 비슷한 KIER의 GHI와 PHIKO의 GHI를 비교하였을 때, 편차는 평균 64 kWh/m^2·yr, 최대 164 kWh/m^2·yr (서울 지역)으로 비교적 적은 편차를 보여주었다.

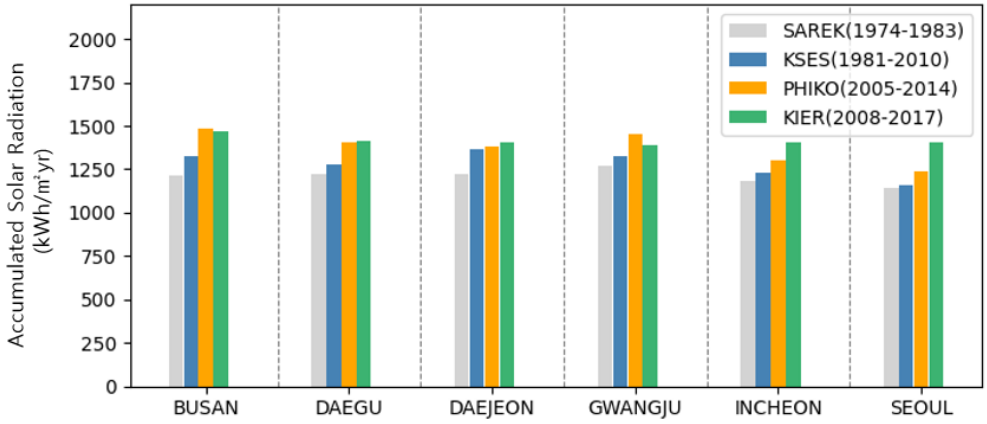

Fig. 2 Accumulated annual solar radiation

월단위 누적 일사량 비교는 6개 지역 중 일사량 누적량이 최솟값, 중앙값, 최대값에 해당하는 지역인 서울, 대전, 부산 3개 지역을 대상으로 수행되었다. Fig. 3은 3개 지역에 대한 일일 누적일사량에 대한 박스 플롯과 각 TMY의 월별 누적일사량 편차를 나타낸 그래프를 보여주고 있다. 월별 누적일사량 편차는 SAREK의 TMY 대비 각 TMY의 편차를 의미한다. 각 지역의 SAREK의 TMY 대비 월별 상대편차는 Table 4에 제시되어 있다.

서울지역의 경우 KIER의 월간 누적일사량이 다른 기상데이터 대비 전체적으로 높은 수치를 보인다. 서울 지역의 SAREK의 대비 KSES와 PHIKO의 월간 누적 GHI의 상대 편차는 평균 각 3.5%, 12.1%로 많게는 각 최대 25.0% (11월), 34.7% (3월)까지 나타났으며 KIER는 SAREK 대비 상대 편차는 평균 26.3%, 많게는 최대 60.9% (3월)까지 나타났다. 대전 지역의 경우, KSES와 PHIKO는 SAREK 대비 상대 편차는 평균 13.6%, 16.1% 많게는 각 최대 43.8% (2월), 36.3% (9월)까지 나타냈으며 KIER의 SAREK 대비 상대 편차는 평균

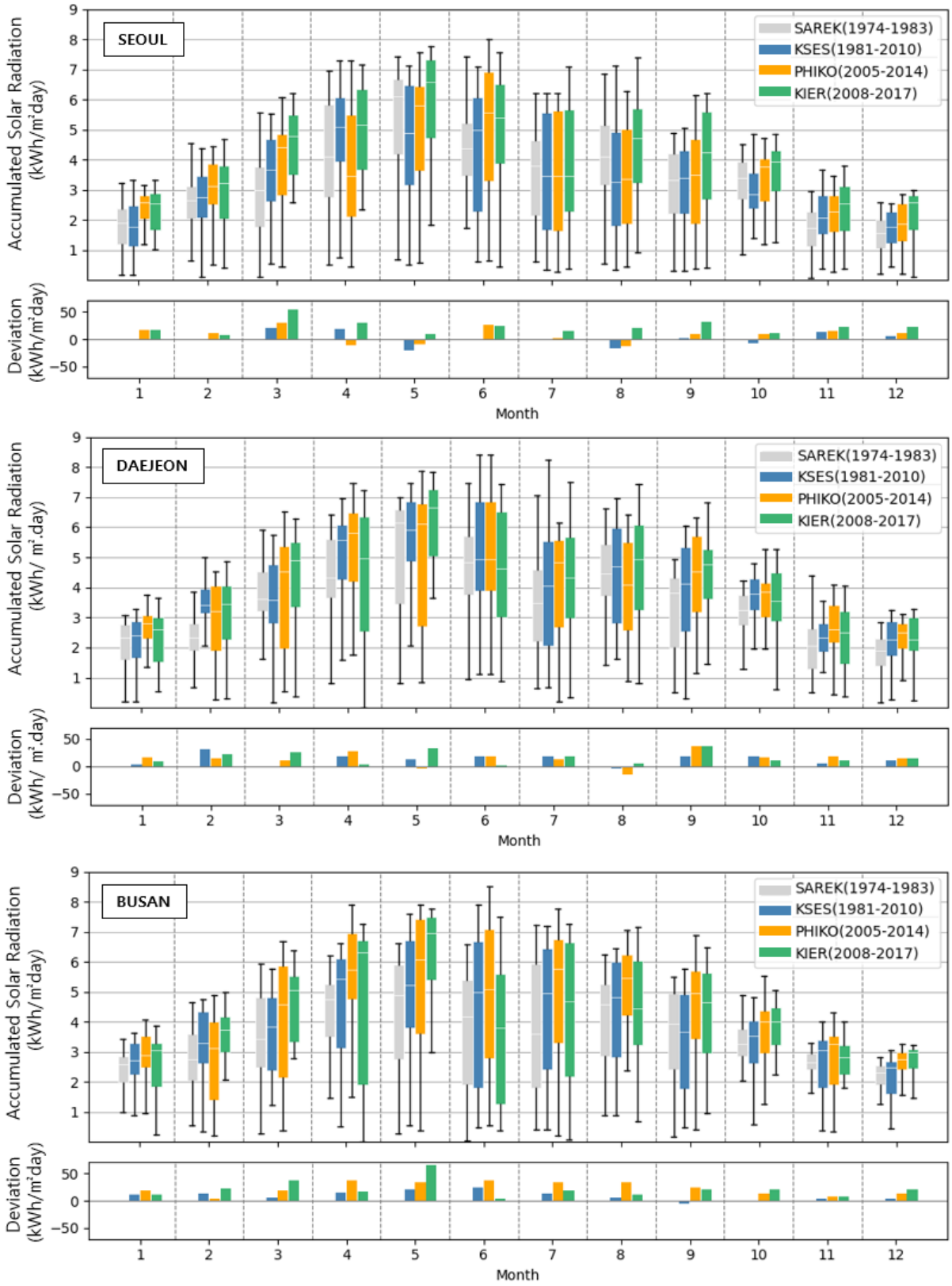

Fig. 3 Accumulated daily solar radiation of TMY

16.8%, 많게는 최대 37.4% (9월)까지 나타났다. 마지막으로 부산 지역의 경우, KSES와 PHIKO는 SAREK 대비 상대 편차는 평균 8.7%, 21.1% 많게는 각 최대 21.8% (6월), 33.0% (6월)까지 나타냈으며 KIER는 SAREK 대비 평균 20.4%, 많게는 최대 50.0% (5월)까지 나타났다.

Table 4 Relative deviation of solar irradiance relative to SAREK TMY

Month	SEOUL			DAEJEON			BUSAN		
	KSES	PHIKO	KIER	KSES	PHIKO	KIER	KSES	PHIKO	KIER
1	-1.2%	30.3%	31.0%	4.5%	26.0%	13.7%	15.3%	26.2%	15.6%
2	0.2%	13.0%	9.6%	43.8%	20.4%	30.7%	15.8%	3.6%	25.2%
3	23.8%	34.7%	60.9%	-0.9%	9.3%	23.3%	5.4%	18.1%	35.5%
4	14.4%	-8.5%	22.9%	14.3%	20.6%	2.6%	11.4%	28.8%	12.8%
5	-12.7%	-5.1%	5.9%	7.8%	-2.1%	20.9%	15.6%	26.4%	50.0%
6	0.0%	19.1%	17.8%	13.4%	13.4%	1.3%	21.8%	33.0%	2.9%
7	-2.3%	1.4%	13.5%	17.1%	11.0%	16.0%	10.8%	28.4%	15.7%
8	-13.9%	-11.3%	16.8%	-3.4%	-10.9%	3.2%	4.8%	25.6%	8.4%
9	2.1%	10.6%	32.6%	17.6%	36.3%	37.4%	-5.6%	22.0%	18.0%
10	-7.4%	8.9%	10.7%	19.5%	16.7%	10.8%	0.4%	12.4%	20.0%
11	25.0%	28.9%	44.1%	9.1%	27.5%	17.0%	3.9%	8.7%	9.3%
12	13.4%	23.2%	49.7%	20.9%	25.2%	24.9%	5.1%	20.6%	30.9%
Aver	3.5%	12.1%	26.3%	13.6%	16.1%	16.8%	8.7%	21.1%	20.4%
Max	25.0%	34.7%	60.9%	43.8%	36.3%	37.4%	21.8%	33.0%	50.0%

국내 TMY의 GHI를 비교한 결과, 최근 제작된 TMY들의 일사량이 전반적으로 높은 경향을 나타낸다. 해당 경향과 국내 일사량 변화와 상관관계가 있는지 검토하기 위해 기상청에서 제공된 데이터를 이용하여 국내 6개 지역(서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 광주)에 대해 관측된 일사량을 확인하였다. Fig. 4는 기상청의 연간 누적 GHI와 국내 TMY의 누적 GHI를 나타낸 그래프이다. 각 TMY의 누적 GHI가 위치한 연도는 TMY 제작에 사용된 기상데이터의 평균 시점을 나타낸다.

기상청 GHI와 TMY의 GHI는 양의 상관관계를 보인다. 기상청 GHI에 대한 회귀식과 TMY 사이의 상관계수는 6개 지역에서 0.8 이상으로 나타나 기상청 GHI 또한 최근 데이터일수록 증가하는 경향을 보인다. 도출된 회귀식에 따르면 연간 누적 일사량은 분석 기간동안 평균 0.0067 MJ/m^2·yr 증가하는 것으로 나타났으며, 최근 10년(2012 – 2021) 평균 일사량은 과거 10년(1984 – 1993) 평균 대비 6개 지역 평균 0.187 MJ/m^2·yr (12.9%) 증가된 것으로 나타났다. 특히 대전은 가장 높은 증가율을 보이는 지역으로 과거 10년 평균 일사량 대비 최근 10년 평균 일사량이 0.286 MJ/m^2·yr (18.7%) 더 높은 수치를 나타냈다.

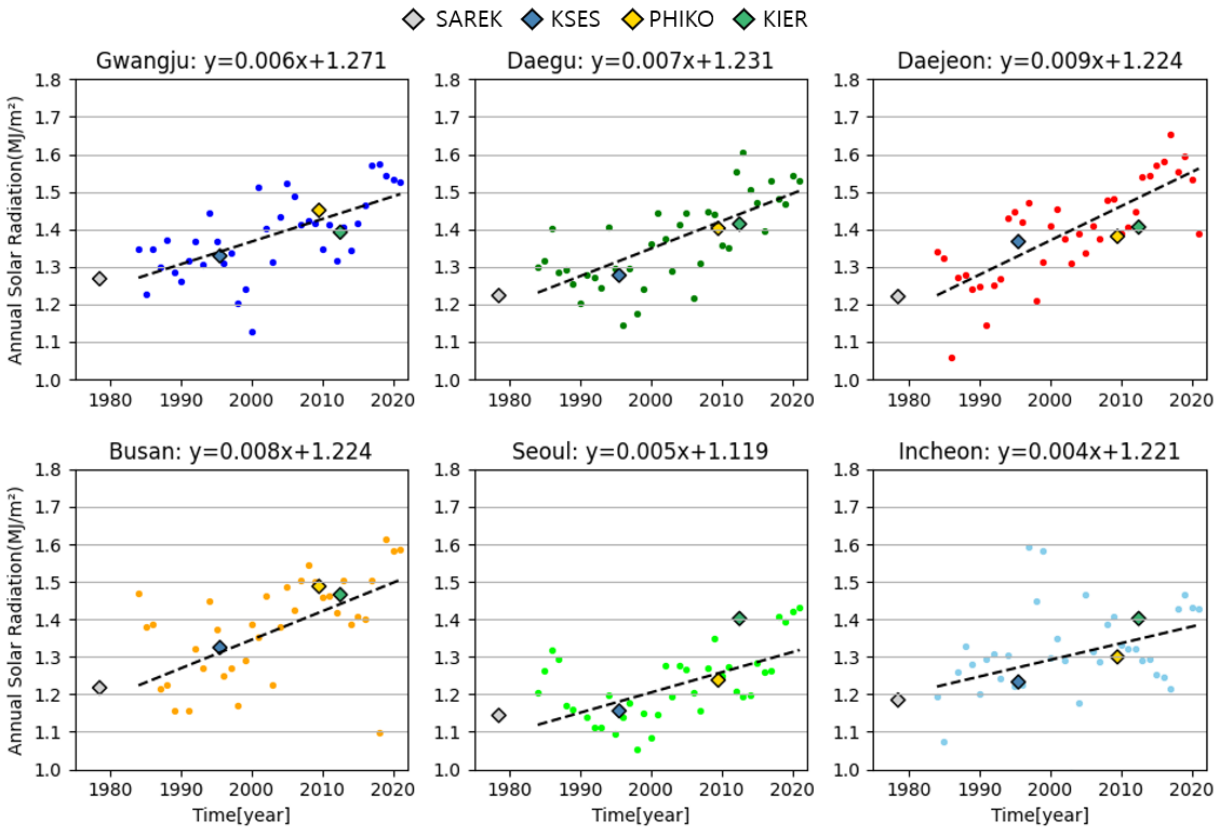

Fig. 4 Solar radiance trend in Korea for 38 years (1984 - 2021)

선행연구에 따르면 인공위성으로부터 관측된 국내 일사량은 1996년부터 2019년까지 해마다 0.019 kWh/m^2·day의 속도로 증가 되었다고 보고되었다[32]. 일사량 증가의 원인과 관련하여 Chung (2019)[13]는 일사량의 증가가 대기 중 미세먼지감소로 인한 대기투과율의 증가와 양의 상관관계가 있음을 보였으며 Choe and Yun (2009)[33]은 에어로졸의 주요 구성성분인 SO_2의 지속적인 감소로 인해 대기 투과율이 감소하고 이에 따라 지표면 도달 태양복사의 증가 추세가 지속될 수 있다고 보고하였다.

3.2 경사각 및 방위각에 따른 경사면 일사량 비교

경사면 일사량의 차이를 검토하기 위해 대상 TMY의 GHI를 경사면 누적 일사량으로 변환하였다. Fig. 5는 3개 지역(서울, 대전, 부산)에 대한 경사각 및 방위각에 따른 연간 누적 일사량을 극좌표로 나타낸 그래프이다. 반지름 좌표 성분과 각도 좌표 성분은 각각 경사각과 방위각을 의미하며 해당 위치의 색상은 누적 발전량을 의미한다. 그래프에서 보이듯이 TMY의 일사량 데이터가 최근 관측 데이터를 반영함에 따라 대부분 경사면에서 일사량이 증가하는 경향을 보인다.

수직 경사면 누적일사량의 편차는 방위별로 다양하게 나타났다. SAREK 대비 KIER의 증가량은 남측에서 평균 261.13 kWh/m^2·yr (30.2%)으로 가장 크게 나타났으며 동측과 서측의 연간 증가량은 각각 150.94 kWh/m^2·yr

(21.6%), 137.28 kWh/m^2·yr (19.2%)로 나타났다. 반면 북측의 연간 증가량은 −18.21 kWh/m^2·yr (0.03%)로 매우 적은 편차를 보였다. 특히 입사되는 일사량이 가장 높은 경사면(방위각 180°, 경사각 30°)에서는 차이가 두드러지는데, 해당 경사면의 SAREK 대비 KIER의 일사량 증가량은 서울지역의 경우 371 kWh/m^2·yr (23.8%), 대전지역의 경우 278 kWh/m^2·yr (18.0%), 부산지역 경우 337 kWh/m^2·yr (20.7%)로 KIER에서 전체적으로 약 20% 높게 나타났다.

이에 따라 특정 누적일사량을 확보할 수 있는 경사각 및 방위각의 범위 또한 각 TMY 데이터에 따라 달라지는 양상을 보인다. 1200 kWh/m^2·yr 이상의 일사량을 기준으로 해당 일사량을 확보할 수 있는 경사면 비율을 살펴보면, SAREK의 일사량 데이터에서는 서울지역에서는 0%, 대전지역은 24.2%, 부산지역은 25.5%로 나타났으나, KIER의 일사량 데이터에서는 서울지역에서는 51.9%, 대전지역은 52.1%, 부산지역은 56.8%로 대부분의 경사면에서 1200 kWh/m^2·yr 이상의 일사량을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

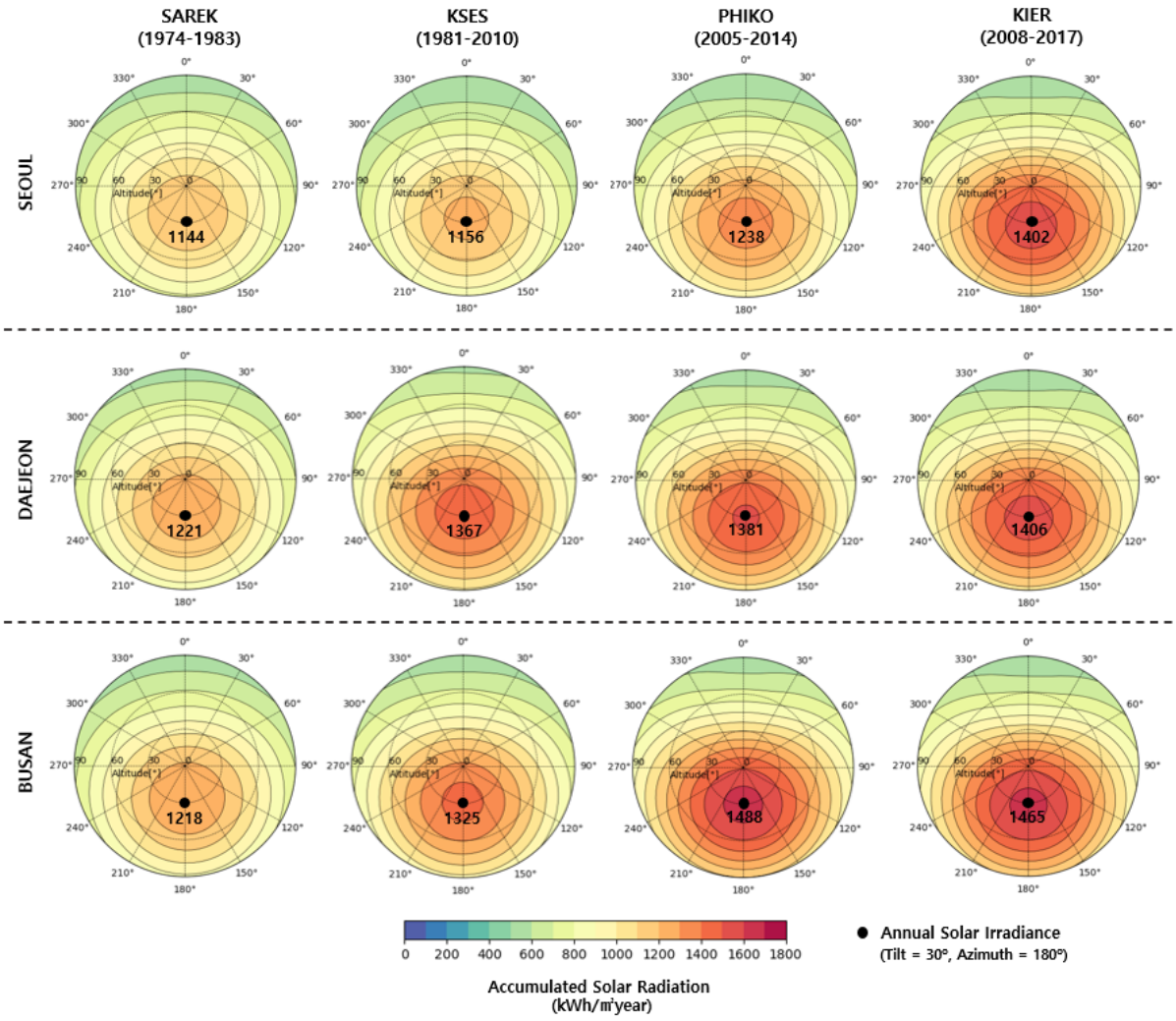

Fig. 5 Polar plot of accumulated solar radiation on inclined surfaces

4. 결 론

본 연구에서는 현재까지 공개된 국내 TMY의 일사량 데이터를 비교분석 함으로써 국내 TMY 일사량 편차를 정량적으로 검토하였다. 비교 대상 TMY의 GHI를 월단위 누적량 및 연단위 누적량으로 비교하였으며 이후 GHI를 방위각 및 경사각에 따른 연간 누적 일사량으로 변환함으로써 경사면 일사량 변환에 따른 차이가 검토되었다.

1) 연간 누적 GHI를 6개 지역에 대해 비교한 결과, 제작시점이 가장 오래된 SAREK의 일사량은 타 표준기상 데이터 대비 낮은 수치를 보인다. 제작연도의 차이가 큰 KIER와 SAREK를 비교하였을 때, 평균 편차는 204 kWh/m^2·yr (14.4%)로 최대 258 kWh/m^2·yr (16.9%, 서울 지역)까지 나타난다. 한편 제작 시점이 비슷한 PHIKO와 KIRE의 TMY 일사량 편차는 비교적 적은 편차를 보였다. 평균 64 kWh/m^2·yr (4.6%)의 편차를 보였으며 최대 편차는 164 kWh/m^2·yr (11.7%, 서울 지역)로 나타났다. 해당 결과는 최근 관측된 일사량이 과거 일사량 대비 증가함에 따른 영향으로 보이며 최근 제작연도의 TMY의 일사량이 비교적 데이터의 편차 또한 증가하는 양상이 나타난다.
2) 월단위 누적 GHI를 SAREK 기준으로 비교하면 TMY의 편차는 더욱 두드러진다. 해당 차이는 단일 월 단위로 보았을 때 적게는 0.2%에서 많게는 60.9%까지 다양하게 나타나며 특히 SAREK 대비 PHIKO와 KIRE의 편차가 높은 경향을 보였다. 결과에 따르면 단기 기상데이터의 월단위 편차의 범위는 매우 다양하므로 시뮬레이션의 기간이 짧을수록 입력 기상데이터에 대해 사용자의 충분한 검토가 요구된다.
3) 각 TMY의 수평면 일사량을 경사면 일사량으로 변환하여 비교한 결과, 비교적 최근 제작된 TMY 데이터일수록 대부분의 방위각 및 경사각에서 증가되는 경향이 나타난다. 일사량이 높게 나타나는 남측 경사면에서 가장 큰 증가폭을 보였으며 동측 및 서측 경사면에서도 유의미한 증가량를 보였다. 반면 직달 일사의 영향이 적은 북측의 입면의 경우 가장 증가폭이 적었는데 특히 수직 경사면의 누적일사량 차이는 0.1% 미만으로 미미하게 나타났다.

4개 국내 TMY를 대상으로 일사량이 비교되었으며 그 결과, 같은 지역이라도 TMY에 따라 일사량은 유의미한 차이를 보였다. 건물에너지는 일사획득량에 따라 결과가 다양할 수 있기 때문에 기상자료로 입력되는 TMY에 따라 건물에너지 해석 결과 또한 달라질 것이다. 특히 외피의 태양열 흡수율이 높거나 창면적비가 큰 건물은 일사량의 영향을 상대적으로 크게 받으므로 TMY의 일사량 차이는 중요하게 고려될 필요가 있다[34].

해당 결과들은 제작이 완료된 TMY의 GHI를 대상으로 비교 분석된 결과로써 TMY3, TRY 등 제작 방식에 따른 차이가 고려되지 않아 제작연도에 따른 TMY 대표성을 나타내기에는 미흡한 면이 있다. 따라서 차후 이러한 불확실성을 반영하여 제작연도에 따른 정량적인 비교 연구를 진행할 필요가 있다. 또한 본 연구 결과를 기초로 하여 TMY의 일사량 차이가 건물에너지 및 신재생에너지 시스템 해석 결과에 미치는 영향을 조사하는 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(21CTAP-C163698-01).

REFERENCES

1. Ballif, C., Perret-Aebi, L. E., Lufkin, S., and Rey, E., Integrated Thinking for Photovoltaics in Buildings, Nature Energy, Vol. 3, No. 6, pp. 438-442, 2018, https://doi:10.1038/s41560-018-0176-2.
2. Ministry of Trade Industry and Energy, Use and Diffusion of New and Renewable Energy, Act on the Promotion of the Development, 2022. https://www.law.go.kr. last accessed on the 5th December 2022.
3. Yoo, H.-C. and Park, S.-H., Comparative Analysis of Diverse Typical Weather Data Model for Building Energy Assessment, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 30, No. 3, pp. 215-222, 2014, https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.2014.30.3.215.
4. Wilcox, S. and Marion, W., Users Manual for TMY3 Data Sets, National Renewable Energy Lab, Technical Report No. NREL/TP-581-43156, 2008.
5. Kim, H.-G., Study on the Standard Weather Data for Dynamic Air-Conditioning Load Calculation, Seoul National University, TRKO200200012150, 1987.
6. Yoo, H.-C., Generation of Typical Meteorological Year Data for Major Cities in Korea, The Magazine of Korean Solar Energy Society, Vol. 8, No. 1, pp. 42-45, 2009.
7. Passive House Institute Korea, TMY for 70 regions in Korea, 2017. http://www.phiko.kr. last accessed on the 5th December 2022.
8. Korea Institute of Energy Research, Standard Reference Data, 2020. https://kier-solar.org/. last accessed on the 5th December 2022.
9. Kočí, J., Kočí, V., Maděra, J., and Černý, R., Effect of Applied Weather Data Sets in Simulation of Building Energy Demands: Comparison of Design Years with Recent Weather Data, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 100, pp. 22-32, 2019, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.022.
10. Kim, E.-Y. and Jun, H.-J., A Study on Influence of Type of Weather Data on Results of Building Energy Performance Simulation, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 29, No. 3, pp. 317-326, 2013, https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.2013.29.3.317.
11. Li, D. H. W. and Lam, J. C., Solar Heat Gain Factors and the Implications to Building Designs in Subtropical Regions, Energy and Buildings, Vol. 32, No. 1, pp. 47-55, 2000, https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00035-3.
12. Yoo, H.-C. and Hwang, H.-S., Climate Change and Building Load Variation by Regional Characteristics, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 29, No. 3, pp. 345-352, 2013, https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.2013.29.3.345.
13. Chung, M.-H., The Correlation of Solar Radiation and Atmospheric Elements including Air Pollution, The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 19, No. 5, pp. 69-74, 2019, https://doi.org/10.12813/kieae.2019.19.1.069.
14. Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., and Tsvetkov, A., From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface, Science, Vol. 308, No. 5723, pp. 847-850, 2005, https://doi.org/10.1126/science.1103215.
15. Li, Y., Wang, Q., Ren, G., Wang, G., and Zhou, Q., Homogenization and Trend Analysis of 1960-2015 in Situ

Sea Surface Temperature Observations Along the Coast of China, Acta Oceanologica Sinica, Vol. 40, No. 5, pp. 1-11, 2021, https://doi.org/10.1007/s13131-021-1725-2.

16. Wild, M., Wacker, S., Yang, S., and Sanchez-Lorenzo, A., Evidence for Clear-sky Dimming and Brightening in Central Europe, Geophysical Research Letters, Vol. 48, No. 6, 2021, https://doi.org/10.1029/2020GL092216.
17. Yoo, H.-C., Lee, K.-L., and Kang, H.-G., Analysis of Cloud Cover and Solar Irradiance of Typical Meteorological Data, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 29, No. 6, pp. 102-109, 2009, G704-000882.2009.29.6.001.
18. Lee, H.-J., Kim, S.-Y., and Yun, C.-Y., Generation of Typical Meteorological Year Data Suitable for Solar Energy Systems and Analysis of Solar Irradiance Data, New & Renewable Energy, Vol. 13, No. 3, pp. 24-33, 2017, https://doi.org/10.7849/ksnre.2017.9.13.3.024.
19. Kim, S.-Y., Kim, C.-K., Kang, Y.-H., Yun, C.-Y., Jang, G.-S., and Kim, H.-G., Comparative Analysis on the Characteristic of Typical Meteorological Year Applying Principal Component Analysis, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 3, pp. 67-79, 2019, https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.3.067.
20. Jo, E.-H. and Lee, H.-J., Variation of Solar Photovoltaic Power Estimation due to Solar Irradiance Decomposition Models, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 3, pp. 81-89, 2019, https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.3.081.
21. Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A., Diffuse Fraction Correlations, Solar Energy, Vol. 45, No. 1, pp. 1-7, 1990, https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90060-P.
22. International Organization for Standardization, ISO 15927-4:2005 Hygrothermal performance of buildings — Calculation and Presentation of Climatic Data — Part 4: Hourly Data for Assessing the Annual Energy Use for Heating And Cooling, 2005.
23. Skartveit, A., Olseth, J. A., and Tuft, M. E., An Hourly Diffuse Fraction Model with Correction for Variability and Surface Albedo, Solar Energy, Vol. 63, No. 3, pp. 173-183, 1998, https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00067-X.
24. Lee, K.-H., Yoo, H.-C., and Levermore, G. J., Quality Control and Estimation Hourly Solar Irradiation on Inclined Surfaces in South Korea, Renewable Energy, Vol. 57, pp. 190-199, 2013, https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.028.
25. Kim, D.-C. and Seo, J.-S., Development of the Standard Weather Data for Use in HASP Program for the Major Cities in Korea, The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 22, No. 4, pp. 289-298, 1993.
26. Japan Solar Energy Society, Solar Energy Utilization Handbook, Japan Solar Energy Society, Tokyo, 1985.
27. Korea Law Service Center, Enforcement Rule of Korea Meteorological Administration, 2017, https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2000000020465. last accessed on the 5th December 2022.
28. Korea Meteorological Administration, Climatological Normals of Korea (1991-2020), 2021. https://data.kma.go.kr. last accessed on the 5th December 2022.
29. Yoon, J.-H., Performance Validation of Five Direct/Diffuse Decomposition Models Using Measured Direct Normal Insolation of Seoul, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 20, No. 1, pp. 45-54, 2000.
30. Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., and Vignola, F., A New Operational Model for Satellite-Derived Irradiances Description and Validation, Solar Energy, Vol. 73, No. 5, pp. 307-317, 2002, https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00122-6.
31. Maxwell, E. L., A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation, Solar Energy Research Inst, Technical Report No. SERI/TR-215-3087, 1987.
32. Kim, C.-K., Kim, H.-G., Kang, Y.-H., Yun, C.-Y., Kim, B., and Kim, J.-Y., Solar Resource Potentials and

Annual Capacity Factor Based on the Korean Solar Irradiance Datasets Derived by the Satellite Imagery from 1996 to 2019, Remote Sens, Vol. 13, No. 17, 3422, 2021, https://doi.org/10.3390/rs13173422.

33. Choe, M.-H. and Yun, J.-I., On Recent Variations in Solar Radiation and Daily Maximum Temperature in Summer, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 11, No. 4, pp. 185-191, 2009, https://doi.org/10.5532/KJAFM.2009.11.4.185.
34. Michalak, P., Modelling of Solar Irradiance Incident on Building Envelopes in Polish Climatic Conditions: The Impact on Energy Performance Indicators of Residential Buildings, Energies, Vol. 14, No. 14, 4371, 2021, https://doi.org/10.3390/en14144371.